第42卷 第2期
2025年2月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 42 No. 2
Feb. 2025

基于GeoSOM网络的生态修复分区
——以黄河流域山西段为例

李 豪[1,2]， 张 蕾[1,2]， 梁晓磊[1,2]， 刘 庚[2,3]

（1. 太原师范学院经济与管理学院，山西 太原 030619；2. 汾河流域地表过程与资源生态安全山西省重点实验室 山西 太原 030619；3. 太原师范学院地理科学学院，山西 太原 030619）

摘 要：生态修复是落实我国生态文明建设的重大工程，划定分区单元是实施国土整治与生态修复差别化建设的前提条件与重要基础，对制定差异化修复措施具有重要理论与指导意义。以黄河流域山西段为例，引入GeoSOM地理自组织特征映射算法对研究区基于栅格格网单元进行生态修复空间聚类，根据Dunn对聚类有效性进行评价并筛选最优方案，最后结合支持向量机进行生态修复分区界线识别，划定生态修复分区。结果表明：GeoSOM网络空间聚类后进行Dunn指数评价把研究区分为4大类，每一类中指标呈现明显的空间分异特征；支持向量机根据聚类结果识别出10个生态修复分区，并对每个分区提出生态修复策略。对传统SOM网络只强调专题属性的特点进行改进，采用的GeoSOM算法进行聚类可同时对专题属性与空间属性进行相似性度量，更符合空间聚类的特点，为生态修复分区方法提供了新的参考。

关键词：GeoSOM网络；生态修复分区；边界识别；黄河流域山西段

我国进入21世纪之后，经济的高速发展使得资源开发与环境保护两者之间的矛盾不断加深。构建和优化国土空间格局，实现国土空间优化和生态功能提升，是实现区域可持续发展的重要任务。面对中国生态系统及经济社会的多样性及空间差异性，分区管治成为生态系统管理的重要手段[1]。近年来，随着生命共同体理念以及山水林田湖草沙一体化保护和系统治理研究的深入，国土空间生态修复成为区域生态治理的核心内容，而生态修复分区是开展生态修复具体工程项目的空间指引，是开展差异化生态治理的前提基础，对于促进生态系统的保护与恢复、推动区域经济社会与生态环境协调发展具有重要的意义[2]。

目前，生态修复分区主要从以下三个视角开展：一是基于生态安全格局的“源地–阻力面–廊道”研究范式[3-4]，其主要用于生态修复重点区识别，定义的关键区域集中在生态夹点及周围障碍区等区域[5]；二是基于生态系统供需平衡关系权衡生态系统服务供给和需求状况[6-7]，根据供需协调失调程度进行分区；三是识别区域主导生态功能，可综合分析各尺度下的地域分异规律[8]。总体来看，基于安全格局的分区方法，在体现山水林田湖草沙生命共同体方面稍有欠缺，而基于生态系统供需平衡的分区方法在区域主导生态问题的体现上略有不足，相对而言，识别区域主导生态功能的分区方法，更符合区域生态治理与山水林田湖草沙一体化保护修复的理念。传统的自上而下的分区可剖析大尺度的地带差异性，但其受先验知识制约，主观性较强[9]，而分析低级单元如何“聚集”为高级分区单元的自下而上的归纳法更为客观且准确性较高[10]，且从中小尺度揭示了地段分异规律[11]。自下而上的分区方法多数采用了空间聚类分析，以保证分区内的高度相似性和区域间的高度差异性，聚类方法有k-means聚类[12]、两维图论聚类[13]、自组织神经网络聚类[14]

收稿日期：2024-08-29； **修订日期：**2024-10-17
基金项目：山西省哲学社会科学规划课题(2023YY220，2022YJ097)；山西省高校科技创新项目(2023L240)；山西省基础研究计划(202203021212192)
作者简介：李豪(1992-)，男，讲师，主要从事土地利用与生态遥感方面的研究. E-mail: lihao666@tynu.edu.cn
通讯作者：刘庚. E-mail: liugeng9696@126.com

等。其中自组织特征映射(Self-Organizing Feature Map,SOFM)以神经网络为代表的聚类分区法能够基于数据自身特征对未归类的多维数据集作分类,具有保持拓扑结构、自组织性、自适应性且容错能力强等优点[11],但传统的SOFM算法未考虑数据的空间位置约束,仅使用非空间特征进行聚类[15],其生成的聚类在空间上可能会较为分散,空间上不连续违背了自然区划的区域共轭性原则[16],且表达地理空间的局部特性能力弱。兼顾空间与专题属性的地理自组织特征映射(GeoSOM)算法不仅能保持数据的非空间特征拓扑关系,亦能保持地理上的邻近性,生成的聚类在空间上更具有局部性和连贯性,符合地理学第一定律[17-18],但目前鲜见文献报道使用GeoSOM算法进行生态地理分区的研究。

从分区单元来看,有以行政区为分区单元或以格网为分区单元两种方法:第一种方法虽然保持了行政区单元的完整性,方便政策落地,但却忽视了行政区单元内部的差异性,而打破区域自然边界会降低分区的准确度[19];第二种方法保证了分区内部生态功能的空间分异性,但栅格单元往往相互混合,分区之间的边界线不明显,需进行边界识别。以往研究多采用感知和经验进行分区界线提取,但这种界线提取的方法主观性较高,多采用半方差分析[20]和地理探测器[21]进行分区边界验证,但进行界线自动划定的文献较少,支持向量机(Support Vector Machine,SVM)是一种基于统计学习理论的数据挖掘方法,能够对数据实现最优分类,从而实现聚类结果到分区成果的定量转换[22]。

山西省作为黄河中游的省份。随着经济的发展,黄河流域山西段的环境容量超过了其承载能力,水土流失治理效果较差,水资源严重不足,生态系统脆弱,可持续发展受到严重阻碍。黄河流域山西段由北到南区域差异性大,生态环境问题多样,山水林田湖草沙一体化保护和修复具有特殊性和复杂性,生态修复面临巨大挑战[23]。本文以黄河流域山西段为研究区,基于生态系统服务功能重要性和生态脆弱性两个维度构建指标体系,耦合GeoSOM算法和SVM算法进行自动化分区聚类与界线识别,削弱分区过程中人为主观影响,实现全自动化分区,提高分区结果的客观性与准确性。分区方法与结果对黄河流域生态安全屏障建设以及生态修复差异精细化管控具有一定的理论和现实意义。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

黄河流域山西段位于黄河流域中部,是典型的黄土高原地区,黄河在山西段全长965 km,占黄河全长近五分之一,黄河自忻州市偏关县老牛湾入境,至运城市垣曲县碾盘沟出境,流经忻州、吕梁、临汾、运城4市19县(市、区),流域面积9.71×10^4 km^2,约占整个黄河流域总面积的12.9%,占全省总面积的62.2%。区域是全国“两屏三带”生态安全格局中“黄土高原生态屏障”的重要组成部分[24]。同时境内生态环境脆弱,遍布黄土丘陵沟壑侵蚀区,黄河中游多沙,粗沙区水土流失严重。研究区位置如图1所示。

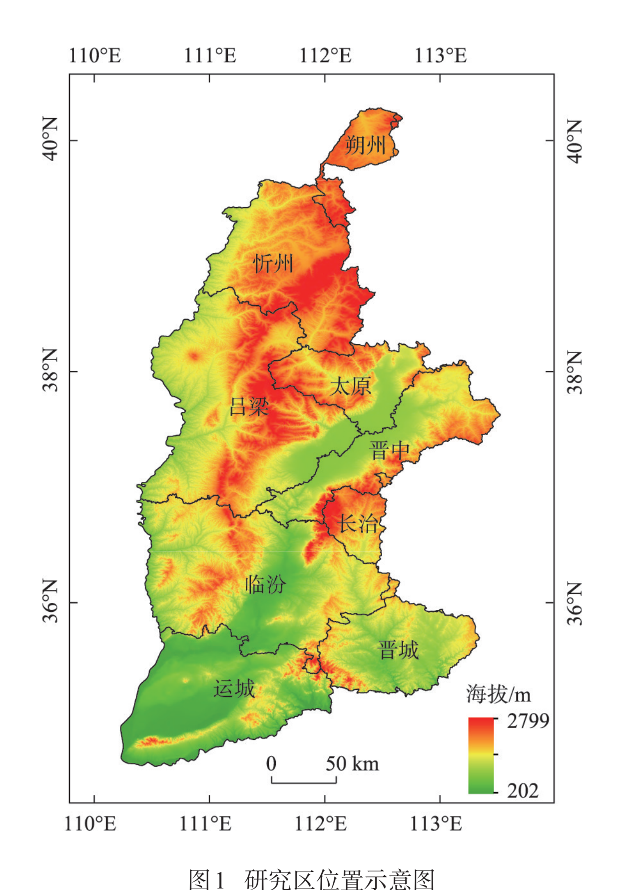


图1 研究区位置示意图

Fig. 1 Location of the study area

1.2 数据来源

本文采用的数据包括以下几大类:① 土地利用数据:2020年中国多时期土地利用遥感监测数据集(CNLUCC)数据,来源于中国科学院资源环境科学数据注册与出版系统(http://www.resdc.cn)[25],用地

类型分为耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地六类,空间分辨率30 m;② 气象数据:降水量、风速等数据,来源于中国气象科学数据共享服务网(http://data.cma.gov.cn),根据提供的研究区及其附近的国家标准气象站点2000—2020年间的月均温和月降水量数据,经过克里金插值得到栅格数据;③ DEM数据:SRTM3V 4.1数据集,来源于地理空间数据云平台(http://www.gscloud.cn),空间分辨率90 m;④ NDVI数据:2020年MOD13Q1数据,来源于地理空间数据云平台(http://www.gscloud.cn),空间分辨率250 m;⑤ 土壤数据:基于世界土壤数据库(HWSD)的中国土壤数据集(v1.1)(2009),来源于国家地球系统科学数据中心(http:/www.geodata.cn),空间分辨率1000 m;⑥ 农田生产潜力数据:2010年中国农田生产潜力数据集数据,来源于中国科学院资源环境科学数据注册与出版系统(http://www.resdc.cn),空间分辨率1000 m;⑦ 行政区划数据:来源于2020年1:250000全国基础地理数据库(https://www.webmap.cn)。以上数据统一为CGCS2000_GK_CM_111E坐标系,空间分辨率1000 m。

2 研究方法

国土空间生态修复致力于系统性地解决核心生态问题,并显著提升基础生态功能,它围绕山水林田湖草沙一体化保护修复这一核心主线,通过合理的分区,为修复工作的有序实施提供科学指引,确保生态修复工作精准落地。具体研究步骤分为四步:首先通过指标优选构建生态修复指标体系并计算每个指标数据值,进行统一栅格分辨率和数据因子归一化等预处理操作;然后采用GeoSOM算法结合相关参数进行聚类分析;再使用Dunn指数对不同聚类方案进行优选,确定聚类个数;最后在聚类结果的基础上使用支持向量机算法提取最佳分区边界,科学划定分区单元。技术路线图如图2所示。

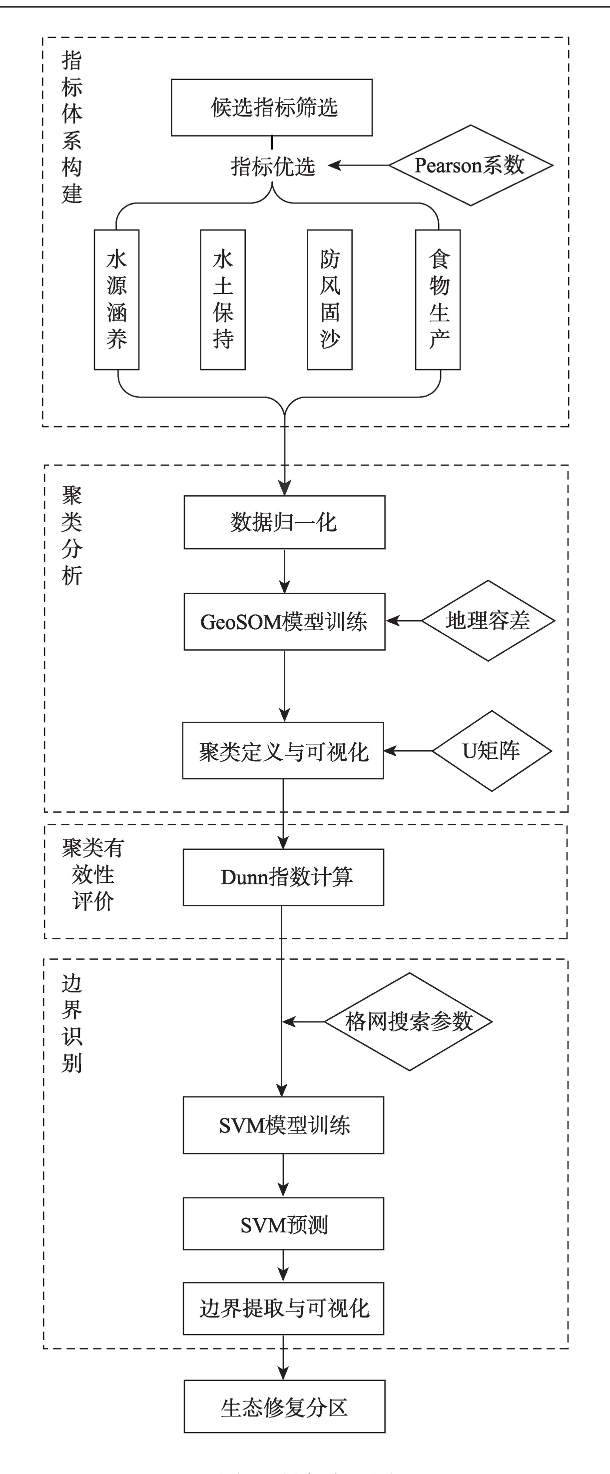


图2 研究流程图

Fig. 2 Flow chart of the research

2.1 生态修复分区指标体系构建

为确保每个指标能独立反映生态系统特征,减少信息冗余,避免统计相关性高的指标引发放大效应,增强指标的解释力和准确度[26],生态修复分区指标的选择遵循指标间的最大相对不相关性,剔除无用指标,基于山水林田湖草沙等生态修复要素的特性,分析因子在时空尺度上的相互作用,选取核心分区指标,确保所选指标具备独立性和显著性。参考相关文献[27-29],生态修复分区主要考量碳固定、固碳释氧、水源涵养、产水、生境质量、土地沙化、防风固沙、食物生产、粮食单产、水土保持、土壤保持、游憩、NDVI、石漠化等14个因子。本研究根据黄河流域山西段的实际生态问题并考虑不同因子反应生态功能或生态问题的重叠性与相关性,通过Pear-

son系数进行指标优选，剔除相关性较高的指标，从生态系统服务功能与生态脆弱性两个维度考量，最终选取水源涵养、水土保持、防风固沙、食物生产4个指标构建生态修复分区的指标体系，各因子的计算如表1[2,29-32]所示。

2.2 地理自组织特征映射网络(GeoSOM)聚类分析

地理自组织特征映射网络(GeoSOM)由Fernando提出[17]，与传统SOM的主要区别在于在搜索获胜神经元时考虑了数据的空间属性，并引入了地理容忍度k参数，分为两阶段进行搜索。首先，通过设置k值决定输入向量的地理邻域及其权重，根据实体间的距离寻找输出层上最匹配的单元；然后在该地理最佳匹配单位的周围，进一步寻找专题属性完全匹配的单元。GeoSOM考虑了地理依赖性，生成的聚类在空间上更为连贯，能检测空间连续性，符合地理学第一定律。通过调整k参数，可以灵活控制地理与专题属性的影响。GeoSOM网络结构如图3所示。

本文采用GeoSOM软件[33]进行地理自组织特征映射网络训练。多指标栅格数据通过ArcGIS创建4 km×4 km渔网并提取至渔网点，转为点要素。通过方差标准化方法对指标统一量纲，并多次实验以

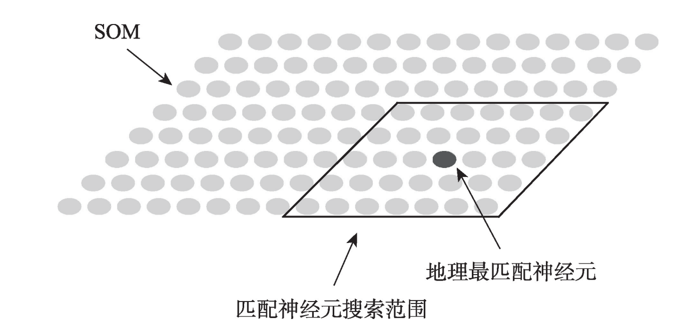


图3 GeoSOM网络结构

Fig. 3 GeosOM network structure

调整地理误差与属性误差大小，最终设定参数地理容忍度k为5，两搜索阶段均迭代100次，其余参数保持默认值，最后通过U矩阵实现聚类成果可视化。

2.3 聚类有效性评价

空间聚类有效性评价的根本目的是确定在空间数据库中最适宜的簇数，以优化空间数据的分组与解释。以往的聚类评价多侧重于专题属性的考量，而往往忽视了空间聚类需同时兼顾专题属性与空间属性的相似性。本文采用Dunn指数[34]对聚类有效性进行评估，计算时综合考量专题与空间属性距离。

Dunn指数计算各类之间的最小两点距离来衡

表1 生态修复分区指标体系

Tab. 1 Ecological restoration zoning indicator system

指标	计算模型	计算公式	参数解释
水源涵养	水量平衡方程[2]	$TQ=\sum_{i=1}^{j}(P_i-R_i-ET_i)\times A_i\times 10^3$	TQ为总水源涵养量(m^3)；P_i为降雨量(mm)；R_i为地表径流量(mm)；ET_i为蒸散发(mm)；A_i为i类生态系统面积(km^2)；i为研究区第i类生态系统类型；j为研究区生态系统类型数
水土保持	修正后的土壤流失RUSLE方程[30]	$A_c=A_p-A_r=R\times K\times L\times S\times(1-C)$	A_c为水土保持量$(\mathrm{t\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}})$；$A_p$为潜在土壤侵蚀量；$A_r$为实际土壤侵蚀量；$R$为降雨侵蚀力因子$(\mathrm{MJ\cdot mm\cdot hm^{-2}\cdot h^{-1}\cdot a^{-1}})$；$K$为土壤可蚀性因子$(\mathrm{t\cdot hm^2\cdot h\cdot hm^{-2}\cdot MJ^{-1}\cdot mm^{-1}})$；$L$、$S$为地形因子，$L$表示坡长因子，$S$表示坡度因子；$C$为植被覆盖因子
防风固沙	估算潜在和实际风蚀强度模拟[29]	$SR=SL_p-SL$ $SL_p=\frac{2Z}{sp^2}\times Q_{p\max}\times e^{-(z/sp)^2}$ $Q_{p\max}=109.8\times(WF\times EF\times SCF\times K')$ $sp=150.71\times(WF\times EF\times SCF\times K')^{-0.3711}$ $SL=\frac{2Z}{sp^2}\times Q_{r\max}\times e^{-(z/sr)^2}$ $Q_{r\max}=109.8\times(WF\times EF\times SCF\times K'\times C)$ $sr=150.71\times(WF\times EF\times SCF\times K'\times C)^{-0.3711}$	SR为固沙量$(\mathrm{kg\cdot m^{-2}})$；$SL_p$为潜在风蚀量$(\mathrm{kg\cdot m^{-2}})$；$SL$为实际风力侵蚀量$(\mathrm{kg\cdot m^{-2}})$；$Q_{p\max}$为潜在风力的最大输沙能力$(\mathrm{kg\cdot m^{-1}})$；$sp$为潜在关键地块长度(m)；$Z$为所计算下风向距离(m)，本次计算取50 m；$WF$为气候因子；$EF$为土壤可蚀性百分比(%)；$SCF$为土壤结皮因子；$K'$为土壤精度因子；$Q_{r\max}$为实际风力的最大输沙能力$(\mathrm{kg\cdot m^{-1}})$；$sr$为实际关键地块长度(m)；$C$为植被因子
食物生产	农田生产潜力数据集[31]，GAEZ模型[32]	$yield_{total}=yield_{rain-fed}(1-i)+yield_{irrigated}\times i$	$yield_{total}$是由GAEZ模型计算的粮食总生产潜力；$yield_{irrigated}$和$yield_{rain-fed}$分别为灌溉和雨养条件下的粮食生产潜力；i为灌溉率，等于灌溉面积与总耕地面积的比率

量类间的分离度,亦使用所有类中最大类直径来衡量类内的紧密度。该指数的值为二者的比值。依据聚类簇内相似性最大、簇间差异性越大的原则,Dunn值越大,类与类的间隔越远,从而聚类结果越佳。对m个空间簇的聚类结果,Dunn指数计算公式如下:

$$D(NC)=\min\left\{\min\frac{\min_{x\in C_i,y\in C_j}\mathrm{d}(x,y)}{\max\left\{\max_{x,y\in C_m}\mathrm{d}(x,y)\right\}}\right\}$$

本文采用MATLAB编程实现Dunn指数计算,根据不同的聚类个数计算指数大小,从而进行方案优选,确定最优聚类个数。

2.4 边界识别

分区边界的识别采用支持向量机算法。采用径向基函数核(RBF Kernel)作为主要核函数,其中核函数参数γ决定单个样本对决策边界的影响程度[35]。使用MATLAB的统计与机器学习工具箱实现SVM,惩罚系数C与γ通过网格搜索法进行确定。具体流程包括:从聚类结果中提取点坐标及对应聚类标签;定义训练参数格网搜索网格,并对每组参数进行5折交叉验证,选择准确率最高的作为最佳参数组合;利用最佳参数训练SVM模型;对原始数据进行预测,最终提取决策边界。

3 结果与分析

3.1 生态要素空间分异特征

图4为黄河流域山西段各指标要素空间分布。从水源涵养指标来看,位于吕梁山区(包括吕梁山北段和中段的芦芽山、黑茶山、关帝山、紫荆山,南段的五鹿山、高天山、人祖山)、太岳-中条山区(包括绵山、霍山等)以及太行山南段等高山地区功能最高,高山区周边的低山区功能次之,而位于中南部的几大断陷盆地区功能最弱。这是因为山地区植被覆盖度高,林冠、枯落物及根系等能够截留降水,减少地表径流,从而增加水源涵养能力,而盆地区是农业活动和城镇建设的主要聚集区,频繁的农业活动、大量的人为干扰以及建设用地不透水层的建设均是造成该区域水源涵养能力低的原因。

从水土保持指标来看,重要区域主要分布在沿黄一带的晋西高原黄土丘陵沟壑区,包括吕梁山西部(河曲、保德、偏关、兴县、柳林、石楼、永和等县),晋西南地区(吕梁山南部的五鹿山、高天山以西地区,包括隰县、大宁、蒲县、吉县);黄土缓坡丘陵区,包括晋西北的五寨、神池和岢岚县宽谷黄土丘陵等。较为重要的区域广泛分布在低山丘陵地区和黄土台地侵蚀区,包括北部的黄土丘陵缓坡风沙区,晋西北洪涛山、黑驼山地区,吕梁山中段东部低山及黄土丘陵区,临汾盆地东部黄土丘陵和低山丘陵区,峨眉台地和中条山西段南部黄土丘陵区等。重要性等级高的区域黄土沉积均较厚,具有疏松多孔、黏结性弱、垂直节理发育、结构稳定性差等特征,在流水与重力释荷双重作用下水土流失严重,形成了沟壑纵横、地表破碎的地貌形态,是水土修复的重要区域。

从防风固沙指标来看,黄河流域山西段防风固沙服务功能重要性主要集中在晋西北、芦芽山以北

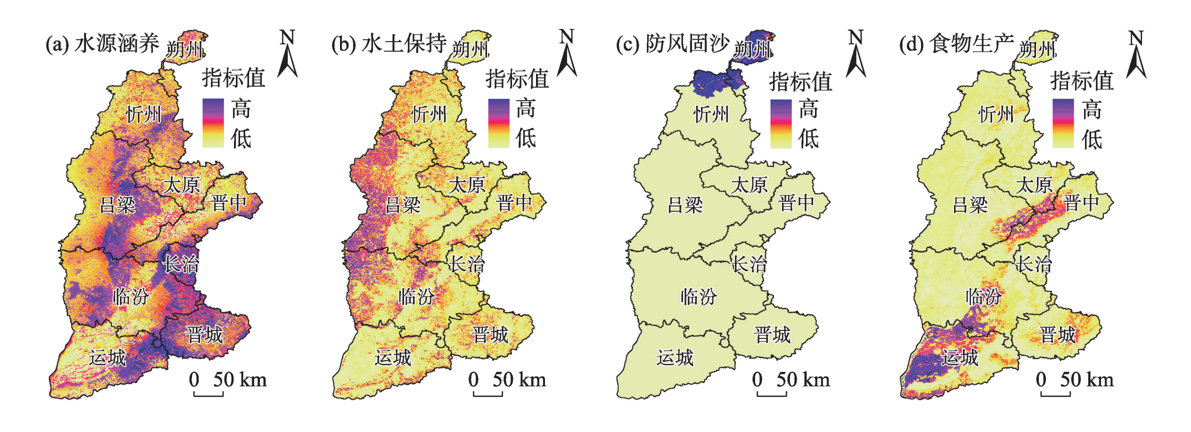


图4　黄河流域山西段生态修复单因子空间分布

Fig. 4　Spatial distribution of single factors for ecological restoration in the Shanxi section of the Yellow River Basin

区域，晋西北地处毛乌素沙地东缘，降水量少，风沙活动频繁，容易受水蚀、风蚀和人为活动的强烈影响，土地沙化脆弱性较高，亦是防风固沙的重要区域。

从食物生产指标来看，高值区域主要集中在中南部几大盆地中，盆地地形平坦，土壤较为肥沃，便于农业机械化耕作，粮食生产能力较高。

3.2 生态修复聚类结果

使用GeoSOM人工神经网络对分区指标结合空间属性进行空间聚类，地理容忍度k设置为5，在U矩阵中进行聚类划分。U矩阵的命中神经元为8个，故在进行聚类有效性评价时，聚类类别个数设置为3~8个。最终得到5个待选的聚类方案，分别计算Dunn指数(图5)。结果显示，聚类个数为4时，Dunn指数值最大，即同一类别的内部最均匀与不同类别之间的外部分离性最大，聚类方案最优。

获取聚类数量之后，统计每一类中4项生态系统因子的平均值，旨在分析每个生态聚类区内的生态系统服务结构，识别每个分区的主导生态系统类型，类别1主导生态功能为防风固沙，类别2主导生态功能为水源涵养，类别3主导生态功能为食物生产，类别4主导生态功能为水土保持。从聚类结果来看，点之间空间分布较为破碎，边界不清晰(图6)。

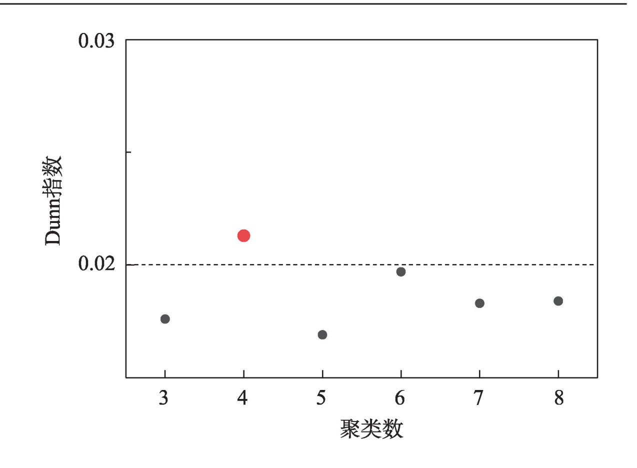


图5 不同聚类方案的Dunn指数

Fig. 5 Dunn index for different clustering schemes

3.3 生态修复分区

基于GeoSOM聚类结果，使用支持向量机进行边界提取，格网搜索时惩罚系数格网为0.1，1，10，100，1000，径向基函数核设置为0.01，0.1，0.5，1，5，共有25组参数组合，经过5折交叉验证，SVM的超参数C和γ最终确定为100和1。采用最佳参数训练SVM模型，并用其进行预测并绘制决策边界，最终得到10个生态修复分区。根据各分区的地理位置、地形地貌以及主导生态功能前面冠以罗马数字进行命名[26]，最终分区结果如图7所示。

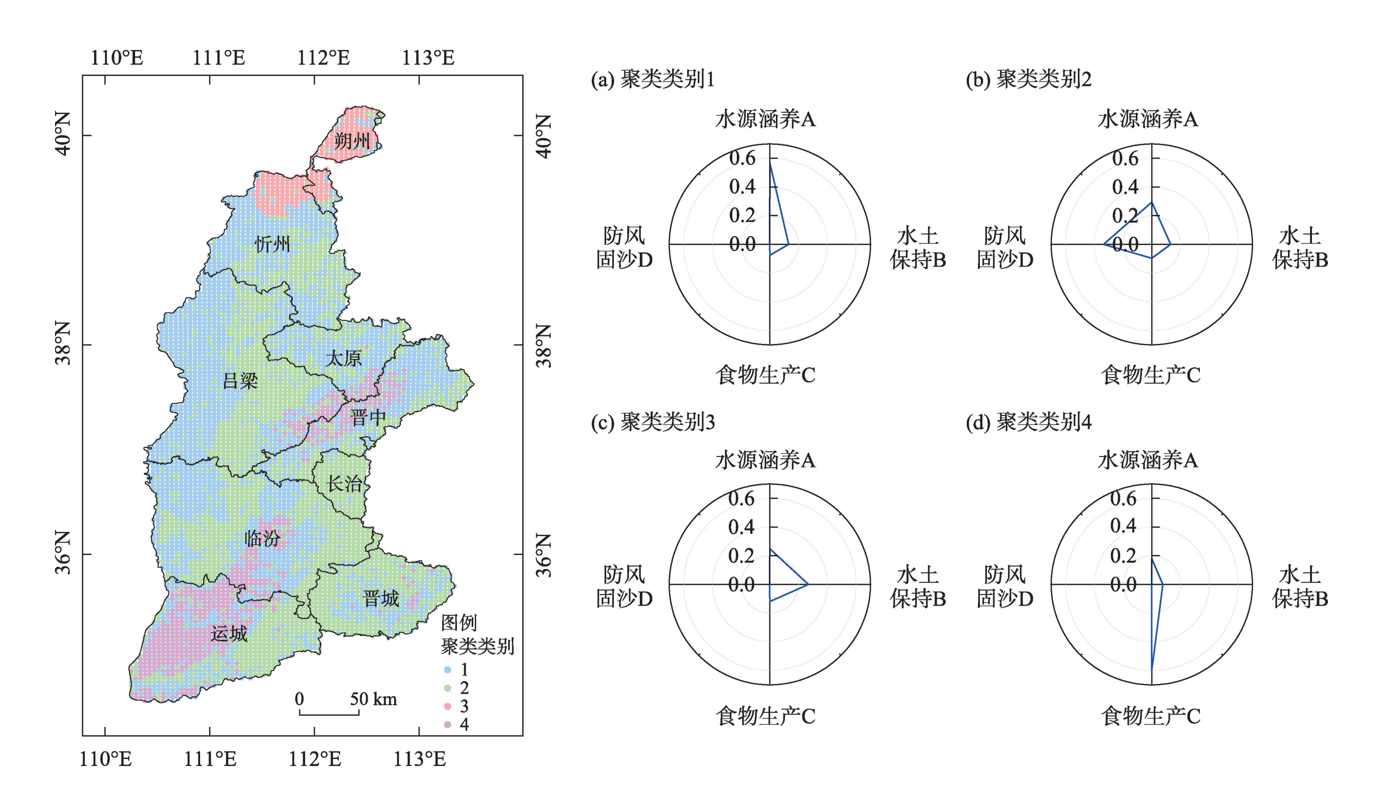
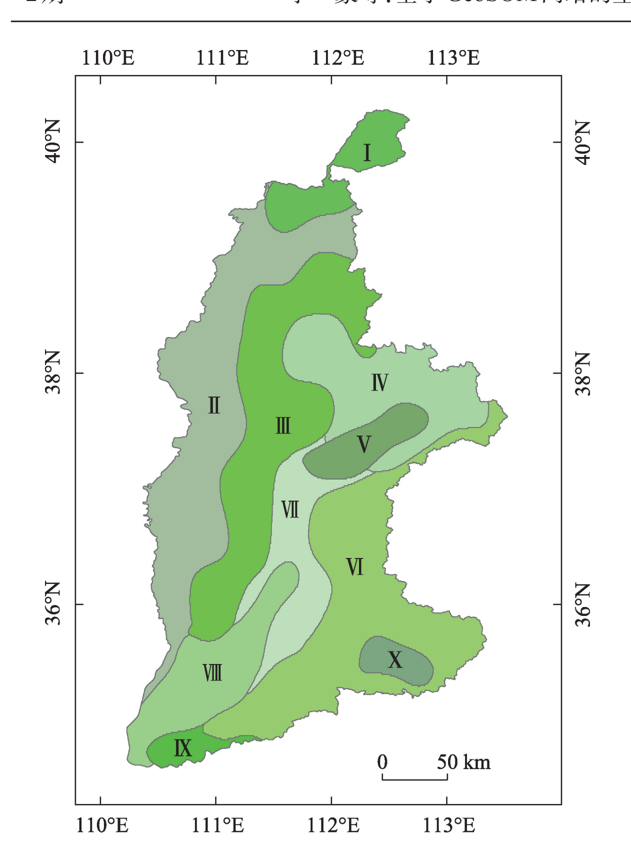


图6 GeoSOM聚类结果与各类别属性雷达图

Fig. 6 GeoSOM clustering results map and radar chart of attributes for each category



注：Ⅰ晋西北防风固沙生态修复区、Ⅱ沿黄丘陵沟壑水土保持生态治理区、Ⅲ吕梁山高山水土涵养生态修复区、Ⅳ太原周边丘陵水土保持生态修复区、Ⅴ太原盆地农产品供给区、Ⅵ太岳-中条-太行山水源涵养生态修复区、Ⅶ吕梁山西侧-太岳山东侧水土保持生态修复区、Ⅷ晋南盆地农产品供给区、Ⅸ中条山南侧农产品供给与水源涵养生态修复区、Ⅹ晋城丘陵盆地农产品供给区。

图7　黄河流域山西段生态修复分区

Fig. 7　Ecological restoration zoning in the Shanxi section of the Yellow River Basin

(1) Ⅰ晋西北防风固沙生态修复区

此区域地处研究区西北，属于温带半干旱大陆性气候，面积4363 km²。包括朔州市平鲁区、右玉县、忻州市偏关县和大同市一小部分，大部分区域降水量<400 mm，在10个分区中最小，风大沙多，土壤侵蚀和土地沙化严重，是京津风沙源三大通道之一，自然生态系统较为脆弱。该区域森林覆盖率远低于研究区和全国平均水平，且现存森林多为天然次生林，质量不高，致使森林生态防护功能低下。

(2) Ⅱ沿黄丘陵沟壑水土保持生态治理区

此区域位于晋陕峡谷山西侧，黄河大北干流左岸，面积20814 km²，在所有分区中面积最大。该区域沟壑纵横，地形破碎，且黄土质地疏松，风蚀与水蚀叠加，土壤侵蚀严重，是全国水土流失最严重的区域之一。

(3) Ⅲ吕梁山高山水土涵养生态修复区

此区域位于吕梁山高山区域，面积为17980 km²，在10个分区内海拔最高，平均海拔为1521 m。该分区从北到南的高海拔区域有芦芽山、黑茶山、关帝山、紫荆山、五鹿山、高天山、人祖山等，涉及忻州、吕梁、临汾三个地级市。本区内林地面积占比达56.85%，是10个分区中林地面积占比最高的区域。

(4) Ⅳ太原周边丘陵水土保持生态修复区

此区域位于太原盆地西北部和东部，集中在山西中部城镇群周边，地形以丘陵为主，面积为10861 km²。

(5) Ⅴ太原盆地农产品供给区

主要分布在山西省中部断陷盆地-太原盆地中，位于汾河中游两岸，面积为3343 km²。该分区地形较为平坦，平均海拔标准差仅为41 m，耕地面积高达76.49%，区域内土壤肥沃，农业生产条件好、潜力大，是山西省主要的农产品供给区。

(6) Ⅵ太岳-中条-太行山水源涵养生态修复区

该区包括太岳-中条山以及南太行山，面积20497 km²，仅次于沿黄丘陵沟壑水土保持生态治理区。区域内生态系统类型多样，生物多样性丰富，太宽河、蟒河流经该区域，历山和灵空山等国家级自然保护区也位于其中。该区域植被覆盖度较高，林地面积占51.99%，在10个分区中仅次于吕梁山高山水土涵养生态修复区。该区域应加强水源涵养林建设，以水定林定草，稳定和提高植被盖度，提高水源涵养功能。

(7) Ⅶ吕梁山西侧-太岳山东侧水土保持生态修复区

此区位于吕梁山西部、太岳山东部，主要涉及吕梁山与太岳山低山丘陵区，面积7269 km²。该区域应以增强水源涵养能力、水土保持能力为主要目标，注重建设水源涵养林和水土保持林。

(8) Ⅷ晋南盆地农产品供给区

该区包括临汾盆地与运城盆地，涉及汾河与涑水河两大流域，海拔平均值为492 m，区域面积8505 km²。其中耕地面积最大，占比达到78.54%，该区是山西的主要灌区和重要商品粮生产基地。

(9) Ⅸ中条山南侧农产品供给与水源涵养生态修复区

该区位于运城中条山南侧，主要涉及芮城县与平陆县，面积为1681 km²。该区内平原和山地并存，

平原区光温条件好，适宜农业耕作，生产潜力较高；山地区主要是部分中条山区域，山地区以提升水源涵养功能为主。

（10）Ⅹ晋城丘陵盆地农产品供给区

该区位于沁河、丹河河谷地带，涉及晋城市城区、泽州县、高平市、沁水县，面积1772 km^2。该区域是国家和山西省农业综合发展的重点区域，优质玉米、杂粮和特色农林产品的主要生产区域。区域内也存在水土流失、林地分布不均、中低产田占比大等问题。

4 讨 论

黄河流域生态保护和高质量发展至关重要，加强黄河流域生态保护意义重大，山西段作为黄河流域的重要组成部分，对其生态修复分区进行研究，对统筹推进山水林田湖草沙矿一体化生态修复，对黄河流域生态保护和高质量发展均具有重要意义。

目前，SOM算法是自下而上分区研究的主导定量方法，但SOM忽略了空间聚类中的空间约束性，仅保证簇内属性值相似，而不保证属于同一簇内的要素在空间上相邻。本文引入了兼顾空间属性和专题属性相似性度量的GeoSOM算法可以避免此问题。GeoSOM通过引入地理容差参数[36]，使得算法在映射过程中不仅考虑属性邻近，亦对空间领域关系进行了强化，确保地理上相邻的数据点在映射空间中也相对接近，空间数据的地理依赖性在算法中得以表达，且通过调整参数k（地理容差）值的大小在不同程度上平衡空间位置属性和专题属性。GeoSOM解决了以往自下而上聚类分区方法空间弱相关的问题[17]，同时灵活调整地理容差可实现不同研究区尺度的分区工作。

此外，空间单元尺度的变化对最终的分区结果具有显著影响[37]，在利用GeoSOM神经网络对多维栅格数据进行聚类时，常出现类别像元相互混杂和破碎度较高的问题。栅格数据分辨率越高，各类地块的混杂现象越显著；而分辨率过低则难以刻画区域的空间分异特征[22]。本文在选择尺度时，依次进行了1 km、2 km、4 km、5 km、8 km的空间点分辨率尝试实验，发现4 km以下混杂程度较高，4 km以上精度无法满足要求，结果亦不理想。最终本文选择4 km作为黄河流域山西段生态修复分区的分辨率，因此，针对不同研究区尺度进行合理的空间分辨率优选是必要的。

支持向量机在进行提取边界时，对大规模样本的训练效率较低[38]，同时需要格网搜索法确定参数，本质是使用尝试选择的参数对模型进行训练，此过程效率较低，故算法耗费时间集中于参数确定阶段。近年来有演化的孪生支持向量机算法，其数学模型是两个支持向量机的二次规划问题，理论效率是支持向量机的4倍，未来的工作可以采用此算法来提升边界识别效率[39]。本文采用耦合GeoSOM与SVM算法形成的定量化分区技术可实现自动化的生态修复分区流程，从而节约大量人力物力，同时避免了基于专家判断的主观性较强等问题，并可及时更新分区内容。

本文基于栅格尺度的空间聚类，得出的生态分区结果与山西省各县主体功能[40]契合性较高：Ⅰ晋西北防风固沙生态修复区与主体功能区的京津风沙源治理生态功能区在空间上吻合，均分布在晋西北地区，涉及神池县、偏关县和平鲁区等区域，该区域冬春季干旱多风，西北风强劲，年平均风速4.1 $m\cdot s^{-1}$。Ⅱ沿黄丘陵沟壑水土保持生态治理区与Ⅸ中条山南侧农产品供给与水源涵养生态修复区与山西省国土空间生态修复规划分区中的黄河流域重点生态治理带对应，均属于黄土高原水土流失治理的重点区域、是保障生态安全、营造山川秀美山西的主体区域，且计算的脆弱性等级与赵乾坤[41]对山西省水土保持功能评价的结果一致；Ⅲ吕梁山高山水土涵养生态修复区区内森林资源丰富，区内分布有芦芽山、黑茶山、关帝山、紫荆山、五鹿山、高天山、人祖山等，该区域范围大部分落在山西省国土空间生态修复规划分区中的吕梁山水源涵养生态修复区；Ⅴ太原盆地农产品供给区与Ⅷ晋南盆地农产品供给区，是山西省优质农产品基地、商品粮基地，Ⅹ晋城丘陵盆地农产品供给区是山西的主要灌区和重要商品农业生产基地，这三个分区主要的功能是农产品供给，分区分布与山西省主体功能区规划中农产品主产区高度一致，也与山西省国土空间生态修复规划分区中的河谷盆地修复区相符。区域内土地利用结构也能很好地佐证分区结果的合理性，分区内Ⅷ晋南盆地农产品供给区、Ⅴ太原盆地农产品供给区、Ⅹ晋城丘陵盆地农产品供给区、Ⅸ中条山南侧农产品供给与水源涵养生态修复区耕地比例均较高，前两者在各自分区内占比超过70%，后两者

超过50%,4个分区主导生态功能均为农产品供给;Ⅲ吕梁山高山水土涵养生态修复区和Ⅵ太岳-中条-太行山水源涵养生态修复区林地比例最高的,占比均超过50%,这两个区域主导功能为水源涵养;Ⅱ沿黄丘陵沟壑水土保持生态治理区内草地占比最高。

对于分区Ⅰ晋西北防风固沙生态修复区,区域应衔接重点造林工程、天然林资源保护工程和退耕还林还草工程等国家生态保护项目,进一步推进防风固沙、植被恢复,以建设防风固沙林为重点,着力提升风沙治理,全面提高区域内的林草覆盖水平。Ⅱ沿黄丘陵沟壑水土保持生态治理区,应建立水土保持监测网络,掌握水土流失动态,预测水土流失变化趋势,为合理配置水土保持工程提供依据,形成综合治理体系,维护和提升区域水土保持功能、防治水土流失,高标准实施保卫黄河生态修复和治理工程。Ⅲ吕梁山高山水土涵养生态修复区,该区应进行林草系统生态修复,加强生态公益林、天然林保育保护、退化草地修复、退化人工林修复、提升林草质量和水源涵养功能;建立生态廊道,促进重要栖息地恢复和废弃地修复,提高生物多样性,从而提高水源涵养能力。Ⅳ太原周边丘陵水土保持生态修复区与Ⅶ吕梁山西侧-太岳山东侧水土保持生态修复区,这两个区域应统筹经济建设与生态环保均衡发展,聚焦水土保持等重大任务,侧重营造水土保持林,提高生态环境承载力。Ⅴ太原盆地农产品供给区、Ⅷ晋南盆地农产品供给区与Ⅹ晋城丘陵盆地农产品供给区应推动农产品保障基地建设,加强高标准农田建设,改造中低产田,提升完善农田林网体系。Ⅵ太岳-中条-太行山水源涵养生态修复区与中条山南侧农产品供给与水源涵养生态修复区应有效涵养水资源,以永久性生态公益林管护为重点,进一步加大天然林资源保护、未成林造林地管护力度。

5 结 论

本文以黄河流域山西段为例,引入GeoSOM地理自组织特征映射算法对研究区基于栅格单元进行生态修复空间聚类,根据Dumm对聚类有效性进行评价并筛选最优方案,最后结合支持向量机进行生态修复分区界线识别,划定生态修复分区,得出如下主要结论:

(1) 引入兼顾专题属性与空间属性的GeoSOM网络能实现黄河流域山西段生态修复指标空间聚类,经过Dunn指数对不同聚类方案进行有效性评价,确定聚类个数为4,每一类指标均呈现明显的空间分异特征。

(2) 黄河流域山西段各生态指标要素空间分异特征显著,水源涵养重要区域主要集中在吕梁山区、太岳-中条山区以及太行山南端,高山区水源涵养功能最强,其附近的低山区次之;水土保持重要区域主要分布在沿黄一带的晋西高原黄土丘陵沟壑区;防风固沙高值区域集中在晋西北、芦芽山以北的区域;食物生产重要区域主要集中在中南部几大盆地中。

(3) 黄河流域山西段划定10个生态修复分区:Ⅰ晋西北防风固沙生态修复区、Ⅱ沿黄丘陵沟壑水土保持生态治理区、Ⅲ吕梁山高山水土涵养生态修复区、Ⅳ太原周边丘陵水土保持生态修复区、Ⅴ太原盆地农产品供给区、Ⅵ太岳-中条-太行山水源涵养生态修复区、Ⅶ吕梁山西侧-太岳山东侧水土保持生态修复区、Ⅷ晋南盆地农产品供给区、Ⅸ中条山南侧农产品供给与水源涵养生态修复区、Ⅹ晋城丘陵盆地农产品供给区。

参考文献(References):

[1] 吴绍洪, 高江波, 戴尔阜, 等. 中国陆地表层自然地域系统动态研究: 思路与方案[J]. 地球科学进展, 2017, 32(6): 569-576. [Wu Shaohong, Gao Jiangbo, Dai Erfu, et al. Research on dynamic of terrestrial system of China: Academic logic and synthetic scheme[J]. Advances in Earth Science, 2017, 32(6): 569-576.]

[2] 王韵秋, 胡业翠, 高梦雯, 等. 多维视角下广西喀斯特石漠化地区国土空间生态修复分区[J]. 农业工程学报, 2023, 39(1): 223-231. [Wang Yunqiu, Hu Yecui, Gao Mengwen, et al. Ecological restoration zoning of land space in Karst rocky desertification areas of Guangxi from a multidimensional perspective[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(1): 223-231.]

[3] 包玉斌, 王耀宗, 路锋, 等. 六盘山区国土空间生态安全格局构建与分区优化[J]. 干旱区研究, 2023, 40(7): 1172-1183. [Bao Yubin, Wang Yaozong, Lu Feng, et al. Construction of an ecological security pattern and zoning optimization for territorial space in the Liupan Mountain Area[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(7): 1172-1183.]

[4] 李可璇, 张蕾, 李豪, 等. 基于MSPA模型和电路理论的晋西北

国土空间生态修复关键区域识别[J]. 干旱区研究, 2024, 41(9): 1593−1604. [Li Kexuan, Zhang Lei, Li Hao, et al. Identification of the key regions of spatial ecological restoration in the Northwest Shanxi based on the MSPA model and circuit theory[J]. Arid Zone Research, 2024, 41(9): 1593−1604.]

[5] 向爱盟, 岳启发, 赵筱青, 等. 国土空间生态修复关键区识别及修复分区——以西南喀斯特山区开远市为例[J]. 中国环境科学, 2023, 43(12): 6571−6582. [Xiang Aimeng, Yue Qifa, Zhao Xiaoqing, et al. Identification of key areas and zoning for ecological restoration in land space: A case study of Kaiyuan City in the Southwest Karst Mountain Area[J]. China Environmental Science, 2023, 43(12): 6571−6582.]

[6] 谢余初, 张素欣, 林冰, 等. 基于生态系统服务供需关系的广西县域国土生态修复空间分区[J]. 自然资源学报, 2020, 35(1): 217−229. [Xie Yuchu, Zhang Suxin, Lin Bing, et al. Spatial zoning for land ecological restoration in Guangxi counties based on the supply and demand relationship of ecosystem services[J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(1): 217−229.]

[7] 岳文泽, 侯丽, 夏皓轩, 等. 基于生态系统服务供需平衡的宁夏固原生态修复分区与优化策略[J]. 应用生态学报, 2022, 33(1): 149−158. [Yue Wenze, Hou Li, Xia Haoxuan, et al. Ecological restoration zoning and optimization strategies in Guyuan, Ningxia based on the balance of ecosystem services supply and demand[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(1): 149−158.]

[8] 张甜, 彭建, 刘焱序, 等. 基于植被动态的黄土高原生态地理分区[J]. 地理研究, 2015, 34(9): 1643−1661. [Zhang Tian, Peng Jian, Liu Yanxu, et al. Ecogeographical zoning of the Loess Plateau based on vegetation dynamics[J]. Geographical Research, 2015, 34(9): 1643−1661.]

[9] 郑度. 中国生态地理区域系统研究[M]. 北京: 科学出版社, 2008. [Zheng Du. Research on China's Ecological Geographical Regional System[M]. Beijing: Science Press, 2008.]

[10] 杨勤业, 郑度, 吴绍洪. 中国的生态地域系统研究[J]. 自然科学进展, 2002, 12(3): 287−291. [Yang Qinye, Zheng Du, Wu Shaohong. Research on China's ecological regional system[J]. Advances in Natural Science, 2002, 12(3): 287−291.]

[11] 张学儒, 张镱锂, 刘林山, 等. 基于SOFM神经网络模型的土地类型分区尝试——以青藏高原东部样带为例[J]. 地理研究, 2013, 32(5): 839−847. [Zhang Xueru, Zhang Yili, Liu Linshan, et al. An attempt at land type zoning based on the SOFM neural network model: A case study of the eastern transect of the Tibetan Plateau[J]. Geographical Research, 2013, 32(5): 839−847.]

[12] 李淑娟, 高琳. 胶州湾北岸滨海地区4个时期生态系统服务价值和生态功能区划分研究[J]. 湿地科学, 2020, 18(2): 129−140. [Li Shujuan, Gao Lin. Study on the value of ecosystem services and zoning of ecological function areas in the northern coastal area of Jiaozhou Bay during four periods[J]. Wetland Science, 2020, 18(2): 129−140.]

[13] 路昌, 雷国平, 周浩, 等. 基于两维图论聚类法的东北地区土地利用分区研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(12): 155−164. [Lu Chang, Lei Guoping, Zhou Hao, et al. Study on land use zoning in Northeast China based on two-dimensional graph theory clustering method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(12): 155−164.]

[14] 马程, 李双成, 刘金龙, 等. 基于SOFM网络的京津冀地区生态系统服务分区[J]. 地理科学进展, 2013, 32(9): 1383−1393. [Ma Cheng, Li Shuangcheng, Liu Jinlong, et al. Zoning of ecosystem services in the Beijing-Tianjin-Hebei region based on SOFM network[J]. Progress in Geography, 2013, 32(9): 1383−1393.]

[15] 邓敏. 空间聚类分析及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2011. [Deng Min. Spatial Clustering Analysis and Application[M]. Beijing: Science Press, 2011.]

[16] 黄姣, 高阳, 赵志强, 等. 基于GIS与SOFM网络的中国综合自然区划[J]. 地理研究, 2011, 30(9): 1648−1659. [Huang Jiao, Gao Yang, Zhao Zhiqiang, et al. Comprehensive natural regionalization of China based on GIS and SOFM Network[J]. Geographical Research, 2011, 30(9): 1648−1659.]

[17] Bação F, Lobo V, Painho M. The self-organizing map, the Geo-SOM, and relevant variants for geosciences[J]. Computers & Geosciences, 2005, 31(2): 155−163.

[18] Bação F, Lobo V S, Painho M. Applications of different self-organizing map variants to geographical information science problems [C]//Lisbon: International Cartographic Conference, 2008.

[19] 彭建, 毛祺, 杜悦悦, 等. 中国自然地域分区研究前沿与挑战[J]. 地理科学进展, 2018, 37(1): 121−129. [Peng Jian, Mao Qi, Du Yueyue, et al. Frontiers and challenges in the study of China's natural regionalization[J]. Progress in Geography, 2018, 37(1): 121−129.]

[20] Gao J, Li S, Zhao Z. Validating the demarcation of eco-geographical regions: A geostatistical application[J]. Environmental Earth Sciences, 2010, 59: 1327−1336.

[21] 董玉祥, 徐茜, 杨忍, 等. 基于地理探测器的中国陆地热带北界探讨[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 135−147. [Dong Yuxiang, Xu Qian, Yang Ren, et al. Discussion on the northern boundary of the tropical zone in China based on geographic detectors[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 135−147.]

[22] 毛祺, 彭建, 刘焱序, 等. 耦合SOFM与SVM的生态功能分区方法——以鄂尔多斯市为例[J]. 地理学报, 2019, 74(3): 460−474. [Mao Qi, Peng Jian, Liu Yanxu, et al. Ecological function zoning method coupling SOFM and SVM: A case study of Ordos City[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(3): 460−474.]

[23] 付绍桐, 贺晨曦, 马佳凯, 等. 不同发展情景下黄河流域山西段生态环境质量[J]. 应用生态学报, 2024, 35(5): 1337−1346. [Fu Shaotong, He Chenxi, Ma Jiakai, et al. Ecological environment quality in the Shanxi Section of the Yellow River Basin under different development scenarios[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024, 35(5): 1337−1346.]

[24] 中华人民共和国国家发展和改革委员会, 中华人民共和国自然资

源部. 全国重要生态系统保护和修复重大工程总体规划(2021—2035年)[EB/OL]. (2020-06-03)[2024-10-12]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020- 06/12/content_5518982.htm. [National Development and Reform Commission of the People's Republic of China, Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. National major orojects for the protection and restoration of important ecosystems general plan (2021-2035)[EB/OL]. (2020-06-03)[2024-10-12]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-06/12/content_5518982.htm.]

[25] 徐新良, 刘纪远, 张树文. 中国多时期土地利用遥感监测数据集(CNLUCC)[DB/OL]. http://www.resdc.cn/DOI.2018. [Xu Xinliang, Liu Jiyuan, Zhang Shuwen. China multi-period land use remote sensing monitoring dataset (CNLUCC)[DB/OL]. http://www.resdc.cn/DOI.2018.]

[26] 姜甜甜. 我国湖泊生态分区技术及应用研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2014. [Jiang Tiantian. Research on Lake Ecological Zoning Technology and Application in China[D]. Wuhan: Wuhan University, 2014.]

[27] 赵娜倩. 山西省山水林田湖草生态保护修复试点区分区及管控研究[D]. 太原: 山西大学, 2019. [Zhao Naqian. Zoning and Management of Ecological Protection and Restoration Pilot Areas in the Mountains, Forests, Rivers, Lakes, and Grasslands of Shanxi Province[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2019.]

[28] 丹宇卓, 彭建, 张子墨, 等. 基于"退化压力-供给状态-修复潜力"框架的国土空间生态修复分区——以珠江三角洲为例[J]. 生态学报, 2020, 40(23): 8451-8460. [Dan Yuzhuo, Peng Jian, Zhang Zimo, et al. Zoning of land space ecological restoration based on the "Degradation Pressure-Supply Status-Restoration Potential" framework: A case study of the Pearl River Delta[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(23): 8451-8460.]

[29] 闫豫疆, 李建贵, 李均力, 等. 面向生态系统服务供需的开都-孔雀河流域生态安全格局研究[J]. 干旱区研究, 2023, 40(5): 829-839. [Yan Yujian, Li Jiangui, Li Junli, et al. Ecological security pattern of the Kaidu-Kongque river basin oriented towards ecosystem services supply and demand[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(5): 829-839.]

[30] 郑仲帅. 县域生态空间动态识别,功能演变与分区管控[D]. 雅安: 四川农业大学, 2022. [Zheng Zhongshuai. Dynamic Identification, Functional Evolution, and Zoning Management and Control of County-Level Ecological Space[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2022.]

[31] 徐新良, 蔡红艳. 中国农田生产潜力数据集[DB/OL]. 北京: 中国科学院地理科学与资源研究所, 2017. [Xu Xinliang, Cai Hongyan. China's farmland production potential dataset[DB/OL]. Beijing: Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, 2017.]

[32] 杨亚东, 段丁丁, 巨章宏, 等. 基于FAO-GAEZ模型的中国马铃薯县域种植空间布局优化[J]. 地理研究, 2022, 41(12): 3352-3363. [Yang Yadong, Duan Dingding, Ju Zhanghong, et al. Optimization analysis of China's potato spatial layout at county level based on FAO-GAEZ model[J]. Geographical Research, 2022, 41(12): 3352-3363.]

[33] Henriques R, Bação F, Lobo V. GeoSOM Suite: A tool for spatial clustering[C]//Proceedings of the Computational Science and Its Applications- ICCSA 2009: International Conference, Seoul, Korea, June 29-July 2, 2009, Proceedings, Part I. Springer, 2009.

[34] 刘燕驰, 高学东, 国宏伟, 等. 聚类有效性的组合评价方法[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(19): 15-17, 30. [Liu Yanchi, Gao Xuedong, Guo Hongwei, et al. A combined evaluation method for clustering validity[J]. Computer Engineering and Applications, 2011, 47(19): 15-17, 30.]

[35] Brereton R G, Lloyd G R. Support vector machines for classification and regression[J]. Analyst, 2010, 135(2): 230-267.

[36] Bação F, Lobo V, Painho M. Geo-self-organizing map (Geo-SOM) for building and exploring homogeneous regions[C]// Springer: Proceedings of the International Conference on Geographic Information Science, 2004.

[37] 吕一河. 生态学中的尺度及尺度转换方法[J]. 生态学报, 2001, 21(12): 2096-2105. [Lü Yihe. Scale and scale conversion methods in ecology[J]. Acta Ecologica Sinica, 2001, 21(12): 2096-2105.]

[38] 丁世飞, 齐丙娟, 谭红艳. 支持向量机理论与算法研究综述[J]. 电子科技大学学报, 2011, 40(1): 9-12. [Ding Shifei, Qi Bingjuan, Tan Hongyan. A review of support vector machine theory and algorithms[J]. Journal of the University of Electronic Science and Technology of China, 2011, 40(1): 9-12.]

[39] 丁世飞. 孪生支持向量机：理论、算法与拓展[M]. 北京: 清华大学出版社, 2017. [Ding Shifei. Twin Support Vector Machines: Theory, Algorithms, and Extensions[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2017.]

[40] 山西省人民政府. 山西省主体功能区规划[EB/OL]. (2022-05-13)[2024-10-12]. https://www.shanxi.gov.cn/zfxxgk/zfxxgkzl/fdzdgknr/lzyj/szfwj/202205/t20220513_5976013.shtml. [The People's Government of Shanxi Province. Shanxi Province's main functional area planning[EB/OL]. (2022-05-13)[2024-10-12]. https://www.shanxi.gov.cn/zfxxgk/zfxxgkzl/fdzdgknr/lzyj/szfwj/202205/t20220513_5976013.shtml.]

[41] 赵乾坤. 山西省水土保持功能分区及生态脆弱性评价[D]. 泰安: 山东农业大学, 2014. [Zhao Qiankun. Zoning of Soil and Water Conservation Functions and Evaluation of Ecological Vulnerability in Shanxi Province[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2014.]

Ecological restoration zoning based on the GeoSOM network: A case study of the Shanxi section of the Yellow River Basin

LI Hao[1,2], ZHANG Lei[1,2], LIANG Xiaolei[1,2], LIU Geng[2,3]

(1. School of Economics and Management,Taiyuan Normal University, Taiyuan 030619, Shanxi, China; 2. Shanxi Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology Security in Fenhe River Basin, Taiyuan Normal University, Taiyuan 030619, Shanxi, China; 3. School of Geography Science, Taiyuan Normal University, Taiyuan 030619, Shanxi, China)

Abstract: Ecological restoration is a major project to implement China's ecological civilization construction. Delineating zoning units is a prerequisite and an essential foundation for the differentiated implementation of land remediation and ecological restoration; it holds significant theoretical and guiding value for formulating differentiated restoration measures. Taking the Shanxi section of the Yellow River Basin as an example, this study introduces the GeoSOM (Geographic Self-Organizing Map) algorithm to perform spatial clustering for ecological restoration in the study area based on grid units. The Dunn index evaluated the effectiveness of the clustering and selected the optimal scheme. Finally, the Support Vector Machine (SVM) identified the boundaries of the ecological restoration zones, resulting in the delineation of the ecological restoration areas. The results indicate that, after the GeoSOM network spatial clustering, the study area was divided into four major categories according to the Dunn index evaluation, with each category exhibiting significant spatial differentiation characteristics. Based on the clustering results, the SVM identified ten ecological restoration zones, and ecological restoration strategies were proposed for each zone. This study improves the traditional SOM network, which emphasizes thematic attributes, by using the GeoSOM algorithm that measures the similarity of thematic and spatial attributes, making it more suitable for spatial clustering. The findings provide a new reference for methods of ecological restoration zoning.

Keywords: GeoSOM network; ecological restoration zoning; boundary identification; Shanxi section of the Yellow River Basin